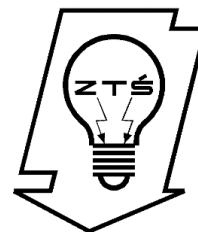


## Ćw. 8. Pomiar temperatury barwowej i wskaźnika oddawania barw

Opracował: Sławomir Zalewski



ZAKŁAD TECHNIKI  
ŚWIETLNEJ

### 1. Wprowadzenie teoretyczne

#### 1.1. Przestrzeń barw i układy współrzędnych trójchromatycznych

W warunkach widzenia fotopowego, czyli gdy jest wystarczająco wysoki poziom oświetlenia otoczenia by oko ludzkie miało pełną zdolność rozróżniania barw, do opisu zdolności postrzegania i rozróżniania barw stosuje się trójchromatyczny rachunek barw. Każdej barwie można w sposób jednoznaczny przypisać punkt w trójwymiarowej przestrzeni metrycznej  $R^3$ . W przestrzeni tej stosujemy jeden z typowych, ogólnie przyjętych układów współrzędnych: *RGB*, *XYZ*, *UVW*, *CIELab*, i t.p. [1].

Układ *RGB* współrzędnych trójchromatycznych jest układem fizjologicznym zbudowanym na rzeczywistej czułości widmowej narządu wzroku człowieka.

Układ *XYZ* współrzędnych trójchromatycznych jest układem obliczeniowym, w którym wszystkie barwy rzeczywiste mają wszystkie współrzędne dodatnie.

Układ *UVW* współrzędnych trójchromatycznych jest układem równomiernym, w którym odległość pomiędzy punktami odpowiadającymi różnym barwom odpowiada odczuciu różnicy barw.

Układ *CIELab* współrzędnych trójchromatycznych jest alternatywnym układem równomiernym, w którym odległość między barwami odpowiada odczuwalnej różnicy barw. Jest to układ o dużo szerszym zastosowaniu i bardziej uniwersalny niż układ *UVW*.

#### 1.2. Krzywa ciała czarnego i temperatura barwowa

Światło określane przez obserwatorów jako białe może mieć różny skład widmowy i różne postrzegane odcienie. Zwykle barwa światła białego jest porównywana do znanych, występujących w naturalnym otoczeniu człowieka, źródeł światła takich jak ogień, słońce, zachmurzone czy pogodne niebo. Wymienione źródła tworzą pewną skalę barwy, zwaną temperaturą barwową. Odniesieniem dla barwy światła umownie białego w tej skali jest promieniowanie temperaturowe emitowane przez promiennik zupełny, zwany też ciałem czarnym. Im ciało czarne ma wyższą temperaturę tym emitowane przez niego promieniowanie jest odczuwane jako chłodniejsze.

Energetyczny rozkład widmowy promieniowania emitowanego przez ciało czarne w określonej temperaturze dany jest wzorem Planck'a [2]:

$$u(\lambda) = \frac{2c^2h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

gdzie:

$c$  – prędkość światła w próżni

$h$  – stała Plancka

$\lambda$  – długość fali

$k$  – stała Boltzmana

$T$  – temperatura ciała czarnego.

Dla barw światła położonych dokładnie na krzywej utworzonej przez punkty określające chromatyczność promieniowania emitowanego przez ciało czarne określa się temperaturę barwową, a dla barw, które leżą poza tą krzywą temperaturę barwową najbliższą.

Najdokładniejszą metodą wyznaczenia temperatury barwowej jest obliczenie współrzędnych trójchromatycznych danego promieniowania i porównanie go z przebiegiem krzywej ciała czarnego na wykresie. Alternatywną metodą wyznaczenia wartości temperatury barwowej najbliższej jest metoda McCamy [3]:

$$\begin{aligned} T_c &= 449n^3 + 3525n^2 + 6823,3n + 5520,33 \\ n &= (x - 0,3320)/(0,1858 - y) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie

$T_c$  – temperatura barwowa najbliższa z zakresu 2 000 – 12 500 K

$x, y$  – współrzędne trójchromatyczne promieniowania.

### 1.3. Oddziaływanie światła z materią i wskaźnik oddawania barw

Temperatura barwowa nie w pełni opisuje promieniowanie postrzegane jako białe. Opisuje jedynie w jaki sposób jest ono postrzegane bezpośrednio przez obserwatora, ale nie opisuje jego wpływu na postrzeganie otoczenia. Promieniowanie emitowane przez różne źródła światła, o różnym rozkładzie widmowym może wywierać na obserwatorze wrażenie tej samej barwy, jednak będzie ono inaczej oddziaływało na przedmioty w otoczeniu i barwa ich może być postrzegana jako różna przy zmianie źródła światła.

Rozkład promieniowania odbitego lub przepuszczonego przez dany obiekt zależy zarówno od rozkładu widmowego promieniowania oświetlającego jak i rozkładu widmowego współczynnika odbicia lub przepuszczania danego obiektu:

$$\begin{aligned} \Phi_\rho(\lambda) &= \Phi_0(\lambda)\rho(\lambda) \\ \Phi_\tau(\lambda) &= \Phi_0(\lambda)\tau(\lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$\Phi_0(\lambda)$  – rozkład widmowy strumienia padającego

$\Phi_\rho(\lambda)$  – rozkład widmowy strumienia odbitego

$\Phi_\tau(\lambda)$  – rozkład widmowy strumienia przepuszczonego

$\rho(\lambda)$  – rozkład widmowy współczynnika odbicia

$\tau(\lambda)$  – rozkład widmowy współczynnika przepuszczania.

Parametrami opisującymi zdolność danego rozkładu promieniowania do wiernego oddawania barw jest zespół 14 szczególnych wskaźników oddawania barw  $R_i$ , gdzie  $i=1 \dots 14$  i wyliczany z nich ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$ .

Szczególne wskaźniki oddawania barw wyznaczone są poprzez obliczenie we współrzędnych  $uv$  zmian barwy 14 próbek wzorcowych oświetlanych naprzemiennie światłem badanym i odniesieniowym. Na źródło odniesieniowe wybiera się spośród iluminantów A, B, C, D<sub>55</sub>, D<sub>65</sub> i D<sub>75</sub> ten, którego barwa (temperatura barwowa) jest najbliższa barwie (temperaturze barwowej) promieniowania badanego. Obecnie oświetlanie próbek światłem badanym i wzorcowym wykonywane jest w sposób wirtualny, na drodze szczegółowych obliczeń przedstawionych w części opisującej praktyczne wykonanie ćwiczenia. Szczególne wskaźniki oddawania barw są równe

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad (4)$$

Gdzie

$i$  – numer wskaźnika od 1 do 14,

$\Delta E_i$  – przesunięcie barwy w układzie  $uv$   $i$ -tej próbki pomiędzy oświetleniem jej światłem badanym i odniesieniowym.

Ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$  wyliczany jest jako średnia arytmetyczna z 8 pierwszych szczególnych wskaźników oddawania barw:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (5)$$

## 2. Cel i opis ćwiczenia

### 2.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie Studentów z metodą wyznaczania temperatury barwowej oraz wskaźnika oddawania barw promieniowania emitowanego przez różne źródła światła.

### 2.2. Pomiary spektralne

Do wyznaczenia temperatury barwowej i wskaźnika oddawania barw niezbędne jest wykonanie pomiarów rozkładu widmowego badanego promieniowania. Pomiary te należy wykonać przy użyciu monochromatora. Pomiary wykonuje się z możliwie najmniejszym krokiem długości fali, nie większym niż 5 nm. Pomiarów dokonuje się po uprzednim wzorcowaniu monochromatora [4].

### 2.3. Obliczenia kolorymetryczne

#### 2.3.1. Temperatura barwowa (najbliższa)

Rzeczywisty rozkład widmowy badanego promieniowania uzyskuje się z wyników pomiarów poprzez podzielenie go przez rozkład widmowy czułości widmowej odbiornika fotoelektrycznego i krzywą dyspersji monochromatora:

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{i(\lambda)}{V_{og}(\lambda)\Delta(\lambda)} \quad (6)$$

Gdzie:

$\Phi_e(\lambda)$  – rozkład widmowy energii promienistej promieniowania badanego,

$V_{og}(\lambda)$  – rozkład widmowy czułości widmowej odbiornika fotoelektrycznego

$\Delta(\lambda)$  – dyspersja monochromatora.

Współrzędne trójchromatyczne barwy promieniowania badanego wyznacza się ze wzorów:

$$\begin{aligned}
 X &= \sum_{\lambda=380}^{760} \Phi_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) \\
 Y &= \sum_{\lambda=380}^{760} \Phi_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) \\
 Z &= \sum_{\lambda=380}^{760} \Phi_e(\lambda) \bar{z}(\lambda)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Gdzie

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – rozkłady składowych trójkromatycznych dane w tabeli 1

**Tabela 1. Składowe trójkromatyczne i współrzędne trójkromatyczne**

$\lambda$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
380	0,0014	0,0000	0,0065	0,1741	0,0050	0,8209
385	0,0022	0,0001	0,0105	0,1740	0,0050	0,8210
390	0,0042	0,0001	0,0201	0,1738	0,0049	0,8213
395	0,0076	0,0002	0,0362	0,1736	0,0049	0,8215
400	0,0143	0,0004	0,0679	0,1733	0,0048	0,8219
405	0,0232	0,0006	0,1102	0,1730	0,0048	0,8222
410	0,0435	0,0012	0,2074	0,1726	0,0048	0,8226
415	0,0776	0,0022	0,3713	0,1721	0,0048	0,8231
420	0,1344	0,0040	0,6456	0,1714	0,0051	0,8235
425	0,2148	0,0073	1,0391	0,1703	0,0058	0,8239
430	0,2839	0,0116	1,3856	0,1689	0,0069	0,8242
435	0,3285	0,0168	1,6230	0,1669	0,0086	0,8245
440	0,3483	0,0230	1,7471	0,1644	0,0109	0,8247
445	0,3481	0,0298	1,7826	0,1611	0,0138	0,8251
450	0,3362	0,0380	1,7721	0,1566	0,0177	0,8257
455	0,3187	0,0480	1,7441	0,1510	0,0227	0,8263
460	0,2908	0,0600	1,6692	0,1440	0,0297	0,8263
465	0,2511	0,0739	1,5281	0,1355	0,0399	0,8246
470	0,1954	0,0910	1,2876	0,1241	0,0578	0,8181
475	0,1421	0,1126	1,0419	0,1096	0,0868	0,8036
480	0,0956	0,1390	0,8130	0,0913	0,1327	0,7760
485	0,0580	0,1693	0,6162	0,0687	0,2007	0,7306
490	0,0320	0,2080	0,4652	0,0454	0,2950	0,6596
495	0,0147	0,2586	0,3533	0,0235	0,4127	0,5638
500	0,0049	0,3230	0,2720	0,0082	0,5384	0,4534
505	0,0024	0,4073	0,2123	0,0039	0,6548	0,3413
510	0,0093	0,5030	0,1582	0,0139	0,7502	0,2359
515	0,0291	0,6082	0,1117	0,0389	0,8120	0,1491
520	0,0633	0,7100	0,0782	0,0743	0,8338	0,0919
525	0,1096	0,7932	0,0573	0,1142	0,8262	0,0596
530	0,1655	0,8620	0,0422	0,1547	0,8059	0,0394
535	0,2257	0,9149	0,0298	0,1929	0,7816	0,0255
540	0,2904	0,9540	0,0203	0,2296	0,7543	0,0161
545	0,3597	0,9803	0,0134	0,2658	0,7243	0,0099
550	0,4334	0,9950	0,0087	0,3016	0,6923	0,0061
555	0,5121	1,0000	0,0057	0,3373	0,6589	0,0038
560	0,5945	0,9950	0,0039	0,3731	0,6245	0,0024
565	0,6784	0,9786	0,0027	0,4087	0,5896	0,0017
570	0,7621	0,9520	0,0021	0,4441	0,5547	0,0012
575	0,8425	0,9154	0,0018	0,4788	0,5202	0,0010
580	0,9163	0,8700	0,0017	0,5125	0,4866	0,0009
585	0,9786	0,8163	0,0014	0,5448	0,4544	0,0008
590	1,0263	0,7570	0,0011	0,5752	0,4242	0,0006
595	1,0567	0,6949	0,0010	0,6029	0,3965	0,0006
600	1,0622	0,6310	0,0008	0,6270	0,3725	0,0005
605	1,0456	0,5668	0,0006	0,6482	0,3514	0,0004
610	1,0026	0,5030	0,0003	0,6658	0,3340	0,0002
615	0,9384	0,4412	0,0002	0,6801	0,3197	0,0002
620	0,8544	0,3810	0,0002	0,6915	0,3083	0,0002

625	0,7514	0,3210	0,0001	0,7006	0,2993	0,0001
630	0,6424	0,2650	0,0000	0,7079	0,2920	0,0001
635	0,5419	0,2170	0,0000	0,7140	0,2859	0,0001
640	0,4479	0,1750	0,0000	0,7190	0,2809	0,0001
645	0,3603	0,1382	0,0000	0,7230	0,2770	0,0000
650	0,2835	0,1070	0,0000	0,7260	0,2740	0,0000
655	0,2187	0,0816	0,0000	0,7283	0,2717	0,0000
660	0,1649	0,0610	0,0000	0,7300	0,2700	0,0000
665	0,1212	0,0446	0,0000	0,7311	0,2689	0,0000
670	0,0874	0,0320	0,0000	0,7320	0,2680	0,0000
675	0,0636	0,0232	0,0000	0,7327	0,2673	0,0000
680	0,0468	0,0170	0,0000	0,7334	0,2666	0,0000
685	0,0329	0,0119	0,0000	0,7340	0,2660	0,0000
690	0,0227	0,0082	0,0000	0,7344	0,2656	0,0000
695	0,0158	0,0057	0,0000	0,7346	0,2654	0,0000
700	0,0114	0,0041	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000

705	0,0081	0,0029	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
710	0,0058	0,0021	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
715	0,0041	0,0015	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
720	0,0029	0,0010	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
725	0,0020	0,0007	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
730	0,0014	0,0005	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
735	0,0010	0,0004	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
740	0,0007	0,0002	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
745	0,0005	0,0002	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
750	0,0003	0,0001	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
755	0,0002	0,0001	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
760	0,0002	0,0001	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
765	0,0001	0,0000	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
770	0,0001	0,0000	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
775	0,0001	0,0000	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000
780	0,0000	0,0000	0,0000	0,7347	0,2653	0,0000

Następnie wyznacza się współrzędne unormowane do jedności:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\
 y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\
 z &= \frac{Z}{X + Y + Z}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Temperaturę barwową (najbliższą) odczytuje się z poniższego wykresu umieszczając na nim punkt wyznaczony ze wzorów (7) lub metodą McCamy daną wzorem (2).

Rys. 1. Krzywa ciała czarnego i linie izotemperaturowe w układzie  $x, y$ .

### 2.3.2. Wskaźnik oddawania barw

Wyznaczenie szczególnych wskaźników wykonywane jest poprzez wyznaczenie współrzędnych trójchromatycznych barwy próbek światłem badanym i odniesieniowym według wzorów (7) i (8) za rozkład widmowy promieniowania podstawiając odpowiednio rozkłady widmowe promieniowania odbitego od poszczególnych próbek przy oświetleniu promieniowaniem badanym i odniesieniowym:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{x,i}(\lambda) &= \Phi_x(\lambda)\rho_i(\lambda) \\
 \Phi_{w,i}(\lambda) &= \Phi_w(\lambda)\rho_i(\lambda)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Gdzie

$\Phi_x(\lambda)$  – rozkład widmowy promieniowania badanego,

$\Phi_w(\lambda)$  – rozkład widmowy promieniowania odniesieniowego,

$\rho_i(\lambda)$  – rozkład widmowy współczynnika odbicia i-tej próbki.

Współrzędne barwy próbek w układzie  $u, v$  obliczane są ze wzoru:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (10)$$

**Tabela 2. Rozkład widmowy promieniowania wybranych iluminantów**

$\lambda$	$S_A(\lambda)$	$S_B(\lambda)$	$S_C(\lambda)$	$S_{D55}(\lambda)$	$S_{D65}(\lambda)$	$S_{D75}(\lambda)$
380	9,80	22,40	33,00	32,60	50,00	66,70
385	10,90	26,85	39,92	35,40	52,30	68,40
390	12,09	31,30	47,40	38,10	54,60	70,00
395	13,36	36,18	55,17	49,10	68,70	86,00
400	14,71	41,30	63,30	61,00	82,80	101,90
405	16,15	46,62	71,81	64,80	87,10	106,90
410	17,68	52,10	80,60	68,60	91,50	111,90
415	19,29	57,70	89,53	70,10	92,50	112,40
420	21,00	63,20	98,10	71,60	93,40	112,80
425	22,79	68,37	105,80	69,70	90,10	108,00
430	24,67	73,10	112,40	67,90	86,70	103,10
435	26,64	77,31	117,75	76,80	95,80	112,20
440	28,70	80,80	121,50	85,60	104,90	121,20
445	30,85	83,44	123,45	91,80	110,90	127,10
450	33,09	85,40	124,00	98,00	117,00	133,30
455	35,41	86,88	123,60	99,30	117,40	132,70
460	37,81	88,30	123,10	100,50	117,80	132,40
465	40,30	90,08	123,30	100,20	116,30	129,80
470	42,87	92,00	123,80	99,90	114,90	127,30
475	45,52	93,75	124,09	101,30	115,40	127,10
480	48,24	95,20	123,90	102,70	115,90	126,80
485	51,04	96,23	122,92	100,40	112,40	122,30
490	53,91	96,50	120,70	98,10	108,80	117,80
495	56,85	95,71	116,90	99,40	109,10	117,20
500	59,86	94,20	112,10	100,70	109,40	116,60
505	62,93	92,37	106,98	100,70	108,60	115,20
510	66,06	90,70	102,30	100,70	107,80	113,70
515	69,25	89,65	98,81	100,40	106,30	111,20
520	72,50	89,50	96,90	100,00	104,80	108,70
525	75,19	90,43	96,78	102,10	106,20	109,60
530	79,13	92,20	98,00	104,20	107,70	110,40
535	82,52	94,46	99,94	103,20	106,00	108,40
540	85,95	96,90	102,10	102,10	104,40	106,30
545	89,41	99,16	103,95	102,60	104,20	105,60
550	92,91	101,00	105,20	103,00	104,00	104,90
555	96,44	102,20	105,67	101,50	102,00	102,50
560	100,00	102,80	105,30	100,00	100,00	100,00
565	103,58	102,92	104,11	98,60	98,20	97,80
570	107,18	102,60	102,30	97,20	96,30	95,60
575	110,80	101,90	100,15	97,50	96,10	93,20
580	114,44	101,00	97,80	97,70	95,80	94,20
585	118,08	100,07	95,43	94,6	92,20	90,60
590	121,73	99,20	93,20	91,40	88,70	87,00
595	125,39	98,44	91,22	92,90	89,30	87,10
600	129,04	98,00	89,70	94,40	90,00	87,20
605	132,70	98,08	88,83	94,80	89,80	86,70
610	136,34	98,50	88,40	95,10	89,60	86,10
615	139,99	99,06	88,19	94,70	88,60	84,90
620	143,62	99,70	88,10	94,20	87,70	83,60
625	147,23	100,36	88,06	92,30	85,50	81,20
630	150,83	101,00	88,00	90,40	83,30	78,70

635	154,42	101,56	87,86	91,40	83,50	78,60
640	157,98	102,20	87,80	92,30	83,70	78,40
645	161,51	103,05	87,99	90,60	81,90	76,60
650	165,02	103,90	88,20	88,90	80,00	74,80
655	168,51	104,59	88,20	89,60	80,10	74,60
660	171,96	105,00	87,90	90,30	80,20	74,30
665	175,38	105,08	87,22	92,10	81,20	74,90
670	178,76	104,90	86,30	93,90	82,30	75,40
675	182,11	104,55	85,30	92,00	80,30	73,50
680	185,43	103,90	84,00	90,00	78,30	71,60
685	188,70	102,84	82,21	84,90	74,00	67,80
690	191,93	101,60	80,20	79,70	69,70	63,90
695	195,11	100,38	78,24	81,30	70,70	64,50
700	198,26	99,10	76,30	82,80	71,60	65,10
705	201,35	97,70	74,36	83,80	73,00	66,60

710	204,40	96,20	72,40	84,80	74,30	68,10
715	207,41	94,60	70,40	77,50	68,00	62,90
720	210,36	92,90	68,30	70,20	61,60	56,40
725	213,26	91,19	66,30	74,80	65,70	60,20
730	216,11	89,40	64,40	79,30	69,90	64,20
735	218,91	88,00	62,30	82,20	72,50	66,70
740	221,66	86,90	61,50	85,00	75,10	69,20
745	224,35	85,90	60,20	78,50	69,30	63,90
750	226,99	85,20	59,20	71,90	63,60	58,60
755	229,58	84,80	58,50	62,40	55,00	50,60
760	232,11	84,70	58,10	52,80	46,40	42,60
765	234,58	84,90	58,00	64,40	56,60	52,00
770	237,00	85,40	58,20	75,90	66,80	61,40
775	239,36	86,10	58,50	73,90	65,10	59,90
780	241,67	87,00	59,10	71,80	63,40	58,30

**Tabela 3. Rozkład widmowy współczynnika odbicia próbek barwnych do wyznaczenia szczególnych wskaźników oddawania barw**

$\lambda$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
360	0,116	0,053	0,058	0,057	0,143	0,079	0,150	0,075	0,069	0,042	0,074	0,189	0,071	0,036
365	0,136	0,055	0,059	0,059	0,187	0,081	0,177	0,078	0,072	0,043	0,079	0,175	0,076	0,036
370	0,159	0,059	0,061	0,062	0,233	0,089	0,218	0,084	0,073	0,045	0,086	0,158	0,082	0,036
375	0,190	0,064	0,063	0,067	0,269	0,113	0,293	0,090	0,070	0,047	0,098	0,139	0,090	0,036
380	0,219	0,070	0,065	0,074	0,295	0,151	0,378	0,104	0,066	0,050	0,111	0,120	0,104	0,036
385	0,239	0,079	0,068	0,083	0,306	0,203	0,459	0,129	0,062	0,054	0,121	0,103	0,127	0,036
390	0,252	0,089	0,070	0,093	0,310	0,265	0,524	0,170	0,058	0,059	0,127	0,090	0,161	0,037
395	0,256	0,101	0,072	0,105	0,312	0,339	0,546	0,240	0,055	0,063	0,129	0,082	0,211	0,038
400	0,256	0,111	0,073	0,116	0,313	0,410	0,551	0,319	0,052	0,066	0,127	0,076	0,264	0,039
405	0,254	0,116	0,073	0,121	0,315	0,464	0,555	0,416	0,052	0,067	0,121	0,068	0,313	0,039
410	0,252	0,118	0,074	0,124	0,319	0,492	0,559	0,462	0,051	0,068	0,116	0,064	0,341	0,040
415	0,248	0,120	0,074	0,126	0,322	0,508	0,560	0,482	0,050	0,069	0,112	0,065	0,352	0,041
420	0,244	0,121	0,074	0,128	0,326	0,517	0,561	0,490	0,050	0,069	0,108	0,075	0,359	0,042
425	0,240	0,122	0,073	0,131	0,330	0,524	0,558	0,488	0,049	0,070	0,105	0,093	0,361	0,042
430	0,237	0,122	0,073	0,135	0,334	0,531	0,556	0,482	0,048	0,072	0,104	0,123	0,364	0,043
435	0,232	0,122	0,073	0,139	0,339	0,538	0,551	0,473	0,047	0,073	0,104	0,160	0,365	0,044
440	0,230	0,123	0,073	0,144	0,346	0,544	0,544	0,462	0,046	0,076	0,105	0,207	0,367	0,044

445	0,226	0,124	0,073	0,151	0,352	0,551	0,535	0,450	0,044	0,078	0,106	0,256	0,369	0,045
450	0,225	0,127	0,074	0,161	0,360	0,556	0,522	0,439	0,042	0,083	0,110	0,300	0,372	0,045
455	0,222	0,128	0,075	0,172	0,369	0,556	0,506	0,426	0,041	0,088	0,115	0,331	0,374	0,046
460	0,220	0,131	0,077	0,186	0,381	0,554	0,488	0,413	0,038	0,095	0,123	0,346	0,376	0,047
465	0,218	0,134	0,080	0,205	0,394	0,549	0,469	0,397	0,035	0,103	0,134	0,341	0,379	0,048
470	0,216	0,138	0,085	0,229	0,403	0,541	0,448	0,382	0,033	0,113	0,148	0,341	0,384	0,050
475	0,214	0,143	0,094	0,254	0,410	0,531	0,429	0,366	0,031	0,125	0,167	0,328	0,389	0,052
480	0,214	0,150	0,109	0,281	0,415	0,519	0,408	0,352	0,030	0,142	0,192	0,307	0,397	0,055
485	0,214	0,159	0,126	0,308	0,418	0,504	0,385	0,337	0,029	0,162	0,219	0,282	0,405	0,057
490	0,216	0,174	0,148	0,332	0,419	0,488	0,363	0,325	0,028	0,189	0,252	0,257	0,416	0,062
495	0,218	0,190	0,172	0,352	0,417	0,469	0,341	0,310	0,028	0,219	0,291	0,230	0,429	0,067
500	0,223	0,207	0,198	0,370	0,413	0,450	0,324	0,299	0,028	0,262	0,325	0,204	0,443	0,075
505	0,225	0,225	0,221	0,383	0,409	0,431	0,311	0,289	0,029	0,305	0,347	0,178	0,454	0,083
510	0,226	0,242	0,241	0,390	0,403	0,414	0,301	0,283	0,030	0,365	0,356	0,154	0,461	0,092
515	0,226	0,253	0,260	0,394	0,396	0,395	0,291	0,276	0,030	0,416	0,353	0,129	0,466	0,100
520	0,225	0,260	0,278	0,395	0,389	0,377	0,283	0,270	0,031	0,465	0,346	0,109	0,469	0,108
525	0,225	0,264	0,302	0,392	0,381	0,358	0,273	0,262	0,031	0,509	0,333	0,090	0,471	0,121
530	0,227	0,267	0,339	0,385	0,372	0,341	0,265	0,256	0,032	0,546	0,314	0,075	0,474	0,133
535	0,230	0,269	0,370	0,377	0,363	0,325	0,260	0,251	0,032	0,581	0,294	0,062	0,476	0,142
540	0,236	0,272	0,392	0,367	0,353	0,309	0,257	0,250	0,033	0,610	0,271	0,051	0,483	0,150
545	0,245	0,276	0,399	0,354	0,342	0,293	0,257	0,251	0,034	0,634	0,248	0,041	0,490	0,154
550	0,253	0,282	0,400	0,341	0,331	0,279	0,259	0,254	0,035	0,653	0,227	0,035	0,506	0,155
555	0,262	0,289	0,393	0,327	0,320	0,265	0,260	0,258	0,037	0,666	0,206	0,029	0,526	0,152
560	0,272	0,299	0,380	0,312	0,308	0,253	0,260	0,264	0,041	0,678	0,188	0,025	0,553	0,147
565	0,283	0,309	0,365	0,296	0,296	0,241	0,258	0,269	0,044	0,687	0,170	0,022	0,582	0,140
570	0,298	0,322	0,349	0,280	0,284	0,234	0,256	0,272	0,048	0,693	0,153	0,019	0,618	0,133
575	0,318	0,329	0,332	0,263	0,271	0,227	0,254	0,274	0,052	0,698	0,138	0,017	0,651	0,125
580	0,341	0,335	0,315	0,247	0,260	0,225	0,254	0,278	0,060	0,101	0,125	0,017	0,680	0,118
585	0,367	0,339	0,299	0,229	0,247	0,222	0,259	0,284	0,076	0,704	0,114	0,017	0,707	0,112
590	0,390	0,341	0,285	0,214	0,232	0,221	0,270	0,295	0,102	0,705	0,106	0,016	0,717	0,106
595	0,409	0,341	0,272	0,198	0,220	0,220	0,284	0,316	0,136	0,705	0,100	0,016	0,729	0,101
600	0,424	0,342	0,264	0,185	0,210	0,220	0,302	0,348	0,190	0,706	0,096	0,016	0,736	0,098
605	0,435	0,342	0,257	0,175	0,200	0,220	0,324	0,384	0,256	0,707	0,092	0,016	0,742	0,095
610	0,442	0,342	0,252	0,169	0,194	0,220	0,344	0,434	0,336	0,707	0,090	0,016	0,745	0,093
615	0,448	0,341	0,247	0,164	0,189	0,220	0,362	0,482	0,418	0,707	0,087	0,016	0,747	0,090
620	0,450	0,341	0,241	0,160	0,185	0,223	0,377	0,528	0,505	0,708	0,085	0,016	0,748	0,039



625	0,451	0,339	0,235	0,156	0,183	0,227	0,389	0,568	0,581	0,708	0,082	0,016	0,748	0,037
630	0,451	0,339	0,229	0,154	0,180	0,233	0,400	0,604	0,641	0,710	0,080	0,018	0,718	0,086
635	0,451	0,338	0,224	0,152	0,177	0,239	0,410	0,629	0,682	0,711	0,079	0,018	0,748	0,085
640	0,451	0,338	0,220	0,151	0,176	0,244	0,420	0,648	0,717	0,712	0,078	0,018	0,748	0,084
645	0,451	0,337	0,217	0,149	0,175	0,251	0,429	0,663	0,740	0,714	0,078	0,018	0,748	0,084
650	0,450	0,336	0,216	0,148	0,175	0,258	0,438	0,676	0,758	0,716	0,078	0,019	0,748	0,084
655	0,450	0,335	0,216	0,148	0,175	0,263	0,445	0,685	0,770	0,718	0,078	0,020	0,748	0,034
660	0,451	0,334	0,219	0,148	0,175	0,268	0,452	0,693	0,781	0,720	0,081	0,023	0,747	0,085
665	0,451	0,332	0,224	0,149	0,177	0,273	0,457	0,700	0,790	0,722	0,083	0,024	0,747	0,087
670	0,453	0,332	0,230	0,151	0,180	0,278	0,462	0,705	0,797	0,725	0,088	0,026	0,747	0,002
675	0,454	0,331	0,238	0,154	0,183	0,281	0,466	0,709	0,803	0,729	0,093	0,030	0,747	0,096
680	0,455	0,331	0,251	0,158	0,186	0,283	0,468	0,712	0,809	0,731	0,102	0,035	0,747	0,102
685	0,457	0,330	0,269	0,162	0,189	0,286	0,470	0,715	0,814	0,735	0,112	0,043	0,747	0,110
690	0,458	0,329	0,288	0,165	0,192	0,291	0,473	0,717	0,819	0,739	0,125	0,056	0,747	0,123
695	0,460	0,328	0,312	0,168	0,195	0,296	0,477	0,719	0,824	0,742	0,141	0,074	0,746	0,137
700	0,462	0,328	0,340	0,170	0,199	0,302	0,483	0,721	0,828	0,746	0,161	0,007	0,746	0,152
705	0,463	0,327	0,366	0,171	0,200	0,313	0,489	0,720	0,830	0,748	0,182	0,128	0,746	0,169
710	0,464	0,326	0,390	0,170	0,199	0,325	0,496	0,719	0,831	0,747	0,203	0,166	0,745	0,188
715	0,465	0,325	0,412	0,168	0,198	0,338	0,503	0,722	0,833	0,751	0,223	0,210	0,744	0,207
720	0,466	0,324	0,431	0,166	0,196	0,351	0,511	0,725	0,835	0,753	0,242	0,257	0,743	0,226
725	0,466	0,324	0,447	0,164	0,195	0,364	0,518	0,727	0,836	0,754	0,257	0,305	0,744	0,243
730	0,466	0,324	0,460	0,164	0,195	0,376	0,525	0,729	0,836	0,755	0,270	0,354	0,745	0,260
735	0,466	0,323	0,472	0,165	0,196	0,389	0,532	0,730	0,837	0,755	0,282	0,401	0,748	0,277
740	0,467	0,322	0,481	0,168	0,197	0,401	0,539	0,730	0,838	0,755	0,292	0,446	0,750	0,294
745	0,467	0,321	0,488	0,172	0,200	0,413	0,546	0,730	0,839	0,755	0,302	0,485	0,750	0,310
750	0,467	0,320	0,493	0,177	0,203	0,425	0,553	0,730	0,839	0,756	0,310	0,520	0,749	0,325
755	0,467	0,318	0,497	0,181	0,205	0,436	0,559	0,730	0,839	0,757	0,314	0,551	0,748	0,339
760	0,467	0,316	0,500	0,185	0,208	0,447	0,565	0,730	0,839	0,758	0,317	0,577	0,748	0,353
765	0,467	0,315	0,502	0,189	0,212	0,458	0,570	0,730	0,839	0,759	0,323	0,599	0,747	0,366
770	0,467	0,315	0,505	0,192	0,215	0,469	0,575	0,730	0,839	0,759	0,330	0,618	0,747	0,379
775	0,467	0,314	0,510	0,194	0,217	0,477	0,578	0,730	0,839	0,759	0,334	0,633	0,747	0,390
780	0,467	0,314	0,516	0,197	0,219	0,485	0,581	0,730	0,839	0,759	0,338	0,645	0,747	0,399

Różnicę barwy każdej z próbek pomiędzy oświetleniem badanym a wzorcowym określa się jako

$$\Delta E_i = \sqrt{(u_{x,i} - u_{w,i})^2 + (w_{x,i} - w_{w,i})^2} \quad (11)$$

Gdzie

$u_{x,i}$ ,  $v_{x,i}$  – współrzędne barwy i-tej próbki oświetlonej źródłem badanym

$u_{w,i}$ ,  $v_{w,i}$  – współrzędne barwy i-tej próbki oświetlonej źródłem odniesieniowym.

Szczególne wskaźniki barw należy obliczyć ze wzoru (4) a ogólny wskaźnik oddawania barw ze wzoru (5).

### 3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić obliczenie rzeczywistego rozkładu energetycznego badanego źródła światła na podstawie wyników przy użyciu monochromatora.

Należy przedstawić wyliczenie współrzędnych trójchromatycznych barwy tego promieniowania, wyznaczenie jej temperatury barwowej najbliższą metodą graficzną i McCamy. Należy wskazać źródło odniesieniowe do wyznaczenia szczególnych i ogólnego wskaźników oddawania barw, w oparciu o to źródło wyznaczyć wskaźniki opisaną metodą. Wyniki należy przedyskutować i uzasadnić błędy.

### 4. Pytania weryfikacyjne

- Jakie układy współrzędnych trójchromatycznych służą do opisu przestrzeni barw?

Przykładowa odpowiedź:

Układ *RGB* współrzędnych trójchromatycznych jest układem fizjologicznym zbudowanym na rzeczywistej czułości widmowej narządu wzroku człowieka.

Układ *XYZ* współrzędnych trójchromatycznych jest układem obliczeniowym, w którym wszystkie barwy rzeczywiste mają wszystkie współrzędne dodatnie.

Układ *UVW* współrzędnych trójchromatycznych jest układem równomiernym, w którym odległość pomiędzy punktami odpowiadającymi różnym barwom odpowiada odczuciu różnicy barw.

Układ *CIELab* współrzędnych trójchromatycznych jest alternatywnym układem równomiernym, w którym odległość między barwami odpowiada odczuwalnej różnicy barw. Jest to układ o dużo szerszym zastosowaniu i bardziej uniwersalny niż układ *UVW*.

- Co to jest promiennik zupełny?

Przykładowa odpowiedź:

Promiennik zupełny to inna nazwa ciała czarnego. Jest to obiekt, którego powierzchnia charakteryzuje się zerowym współczynnikiem odbicia w całym zakresie długości fal elektromagnetycznych. Dzięki tej właściwości pochłania on całość promieniowania jakie na niego padnie, ale równocześnie emituje zgodnie z prawem Plancka całe promieniowanie temperaturowe pochodzące z jego wnętrza. Służy za podstawowy wzorzec rozkładu widmowego promieniowania i barwy światła emitowanego przez ciała w różnych temperaturach.

- Jak zmienia się postrzegana barwa promieniowania ciała czarnego wraz ze wzrostem jego temperatury?

Przykładowa odpowiedź:

Wraz ze wzrostem temperatury ciała czarnego jego barwa zmienia się od czerwonej przez pomarańczową, żółtą, białą do błękitnej. Temperatura ciała czarnego jest opisywana jako tym chłodniejsza im wyższa jest jego temperatura.

- Co jest odniesieniem do oceny jakości oddawania barw w metodzie ogólnego wskaźnika oddawania barw Ra?

Przykładowa odpowiedź:

W metodzie Ra porównuje się postrzeganą barwę 14 próbek barwnych naprzemiennie oświetlonych źródłem badanymi i wzorcowym. Źródłem wzorcowym są iluminanty A, B, C, D<sub>55</sub>, D<sub>65</sub> i D<sub>75</sub>.

- ile ocenianych jest próbek barwnych w metodzie ogólnego wskaźnika oddawania barw?

Przykładowa odpowiedź:

Metoda wskaźnika oddawania barw bazuje na 14 próbkach barwnych. Dla każdej z nich wyznacza się szczególny wskaźnik oddawania barw a z 8 pierwszych ogólny wskaźnik oddawania barw.

- W jaki sposób dokonuje się porównania barwy poszczególnych próbek oświetlonych promieniowaniem badanym i odniesieniowym w metodzie wyznaczania ogólnego wskaźnika oddawania barw?

Przykładowa odpowiedź:

Jako odniesienie w metodzie ogólnego wskaźnika oddawania barw przyjmuje się spośród iluminantów A, B, C, D<sub>55</sub>, D<sub>65</sub> i D<sub>75</sub> ten, dla którego różnica temperatury barwowej między nim a promieniowaniem badanym jest najmniejsza. Próbkę w obecnie stosowanej metodzie oświetla się i porównuje wirtualnie, na drodze obliczeń na rozkładach widmowych promieniowań i współczynników odbicia próbek. Współrzędne barwy próbek oblicza się we współrzędnych XYZ a następnie przelicza na układ uv w celu obliczenia różnicy ich barwy.

## 5. Literatura

[1] Felhorski W., Stanioch W., Kolorymetria Trójchromatyczna, WNT 1973

[2] Mielicki J., Zarys wiadomości o barwie, FRPK, 1997

[3] Hernandez-Andres J., Lee R. Jr., Romero J., Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities, Applied Optics No. 38, vol. 27, 1999

[4] Czyżewski D., Zaleski S., Laboratorium fotometrii I kolorymetrii, OWPW 2007